

# HIZLANDIRILMIŞ ESKİTME SÜREÇLERİ ALTINDA MOTOR TİTREŞİM İŞARETLERİNİN İZLENMESİ VE ARIZA UYARI SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ

Emine AYAZ<sup>(\*)</sup> Serhat ŞEKER<sup>(\*\*)</sup> O. Nuri UÇAN<sup>(\*\*)</sup> Tayfun KAYNAŞ<sup>(\*\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 80626 Maslak, İstanbul

<sup>(\*\*)</sup>İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fak., Elektronik Müh. Bölümü, 34850 Avcılar İstanbul

<sup>(\*\*\*)</sup>İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fak., Bilgisayar Müh. Bölümü, 34850 Avcılar İstanbul

*Anahtar Kelimeler: Elektrik Motoru, Titreşim, Fourier Dönüşümü, İstatistiksel Parametre.*

## ÖZET

Bu çalışmada 5 HP lik üç fazlı asenkron makinanın yapay eskitme süreçleri sonucunda oluşturulmuş rulman arızasına ilişkin titreşim işaretinin Kısa - Zaman Fourier Analizi ve İstatistiksel Analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda ise arızayı temsil eden özelliğin, 2-4 kHz lik bir frekans aralığında yer aldığı gösterilmiş olup, rulman bozulmasını gösteren erken uyarı seviyesi tanımlanmıştır.

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel süreçlerde kullanılan elektrik motorlarının elektriksel ve mekanik kısımlarındaki arızaların erken belirlenmesi, süreç güvenilirliği ve ekonomikliği açısından son derece önemlidir. Bu nedenle, öngörülü bakım (Predictive Maintenance) amaçlı durum izleme (condition monitoring) çalışmaları, makina durum bilgisinin ortaya çıkartılmasının temelini oluşturur.

Bu anlamda, en fazla kullanılan yöntemlerden biri ise spektral analiz yöntemi olup bu yolla makina durum bilgisi frekans tanım bölgesinde kolayca ifade edilebilir. Ayrıca durum bilgisi, zaman serisi şeklindeki verilerin istatistik analizi yoluyla da elde edilebilir. Literatürde ise endüstriyel uygulamalarda kullanılan asenkron motorların arıza belirleme çalışmalarında kullanılmış birçok durum izleme çalışması gerçekleştirilmiştir [1-5]. Bu çalışmalardan ortaya çıkartılan sonuçlara göre arızaların %50 sinden fazlasının ise rulman bozukluğu ve shaft dengesizlikleri gibi mekanik nedenlerden kaynaklandığı görülmüştür. Bu çalışmada ise, makinanın rulman bölgesine yakın noktasındaki titreşim işaretinin, kısa-zaman Fourier dönüşümü incelenerek ve istatistiksel analizi yapılarak, rulman arızasına ilişkin özellik belirlemesi gerçekleştirilmiştir.

## 2 İSTATİSTİKSEL PARAMETRELERİN HESAPLANMASI

Genel anlamda gözönüne alınan bir sistemden alınan işaretleri istatistiksel olarak inceleyerek sistem durumuna ilişkin bilgi çıkartmak stokastik tabanlı durum izleme çalışmasının temel yapısını oluşturur.

Bu anlamda sistemden alınan süreç işaretlerine  $\{x_i\}$  ilişkin bazı istatistiksel parametrelerin değişimlerinin gözlemlenmesi zaman içinde sistemin genel eğilimini belirler. Söz konusu bu istatistiksel parametrelerden bazıları sırasıyla, ortalama ( $\mu$ ), standard sapma ( $\sigma$ ), çarpıklık ( $c$ ) ve basıklık ( $k$ ) dir.

Ortalama değer, işaretin genliklerinin aritmetik ortalaması şeklinde hesaplanıp aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Benzer şekilde, standard sapma da

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

biçimindedir.  $\{x_i\}$  dizisinin dağılımının simetrik durumdan sapmasının ölçüsünü veren çarpıklık (skewness) ise

$$c = \frac{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \right]}{\sigma^3} \quad (3)$$

olup, dağılımın dikliğinin ölçüsünü gösteren basıklık (kurtosis) da aşağıdaki eşitlik ile verilebilir.

$$k = \frac{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 \right]}{\sigma^4} \quad (4)$$

Hesaplanan bu parametrelerin normal-simetrik bir dağılım durumunda  $c = 0$  ve  $k = 3$  değerlerini alması beklenir.

### 3. KISA ZAMAN FOURIER DÖNÜŞÜMÜ

1946 yılında Gabor tarafından tanımlanan Kısa-Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD), işaretlerin frekans bileşenlerinin zaman içindeki yerini ifade etmek için kullanılan bir yöntemdir. KZFD spektrumu sabit bir pencere aralığı vasıtasıyla işareti pencereleyerek bulunur. Söz konusu işaret bu pencere aralığı içinde yaklaşık durağan olarak kabul edilebilir. Pencere aralığı zaman ve frekans çözünürlüklerinin her ikisini de sabitler KZFD yi tanımlamak için,  $\tau$  anında merkezlenmiş  $g(t')$  sabit penceresi içinde durağan kabul edilen bir  $x(t')$  işareti gözönüne alınarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$KZFD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t') g(t' - \tau) \exp[-2\pi f t'] dt' \quad (5)$$

Bu denklem, işareti zaman-frekans ( $t, f$ ) düzlemi içindeki iki boyutlu bir fonksiyona betimler. Bu analiz, seçilen  $g(t')$  penceresine bağlıdır. Uygulamada önce  $g(t')$  penceresi seçilir ve KZFD nin çözünürlüğü, tüm zaman-frekans düzlemi üzerinde sabitlenir. KZFD, zaman-frekans arasındaki uyumayı da sağlar ve her ikisi bakımından da bilgiyi içerir. Ancak bu bilgi sınırlı bir duyarlılıkla bulunur ve bu duyarlılık seçilen pencerenin büyüklüğü ile belirlenir. KZFD de zaman ve frekansın eş anlı çözünürlüğü *belirsizlik prensibi* vasıtasıyla önlenir. Bu durumda, zaman çözünürlüğü pencere uzunluğunu değiştirerek düzeltilirken, frekans çözünürlüğü kötüleşir. Bu anlamda  $\Delta t$  ile verilen ve  $\Delta f$  band genişliğinin çarpımı ile sınırlandırılan *Heisenberg'in belirsizlik eşitsizliği*

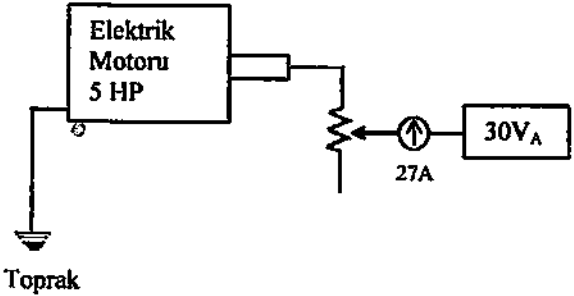
$$\Delta f \times \Delta t \geq \frac{1}{4\pi} \quad (6)$$

şeklinde tanımlanır.

### 4. HIZLANDIRILMIŞ YAPAY ESKİTME SÜREÇLERİ İLE RULMAN BOZUKLUKLARININ OLUŞTURULMASI

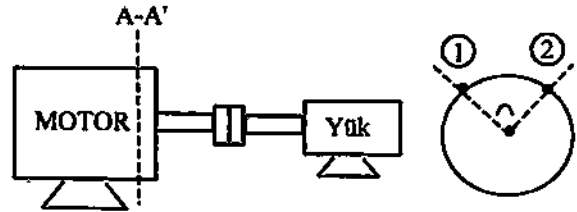
Elektrik motorlarının hareketli kısımlarını oluşturan rotor, iletken olmayan bir gres yağ tabakası ile yalıtılmış bir şekilde, rulman vasıtasıyla tutulur. Rotorun yüksek hızlarında bile bu yağ tabakası varlığını korur ve rotoru, rulmanın dış bileziği ile temas ettirmez. Ancak rotor gerilimi toprağa göre artabilir ve bu durumda yağ tabakasının yalıtkanlığı delinerek kıvılcım şeklinde elektriksel atlamalar söz konusu olabilir. Böylece boşalma modunda rulman içinden bir akım akar. Alçak hızlarda ise, yağ tabakası çok ince hale gelerek rulman bilyeleri bilezik ile daha iyi temas eder. Bu durumda, boşalma modundaki gibi gerilim yükselmesi oluşmaz ancak, rulman içinden iletim modu şeklinde bir akım akmaya başlar.

Böylece rulman akımları boşalma ve iletim şeklinde iki moda ortaya çıkar. İletim modu rulman içinde sürekli bir akım oluşturur, ancak erken bir arızaya sebebiyet vermez. Boşalma modu ise ark oluşumları ile rastlantısal akımları oluşturur ve yağ tabakasını bozar ve aynı zamanda noktasal rulman yüzey bozukluklarına neden olur. Bu çalışmada rulman şaftında oluşan elektriksel boşalmanın benzetimi için aşağıdaki gibi bir deney düzeneği oluşturulmuştur.



Şekil 1. Yapay rulman eskitmesi.

Şekil 1 den de görüldüğü gibi şaft dışarıdan 27 A lik bir akım uygulanmıştır. Bu şekildeki eskitmenin yanı sıra ayrıca yedi aşamada uygulanan termal ve kimyasal eskitme süreçleri de gerçekleştirilmiştir. Her süreçten sonra eskime hızlanmış ve motor bir test platformu üzerinden performans testinden geçirilmiştir. % 0-115 lik yük altında gerçekleştirilen performans testinde rulman arızasının analizinde kullanılacak olan titreşim işareti Şekil 2 deki A-A' kesitine göre 2 numaralı konumdaki titreşim algılayıcısından alınmıştır.



Şekil 2. Performans testi ve algılayıcı yerleri.

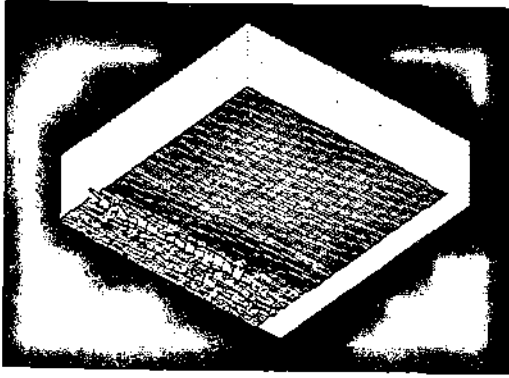
### 5. UYGULAMA

5 HP lik 3 faz 4 kutuplu endüksiyon motorunun yedi eskime süreci sonrasında motor performans testi yapılarak %100 yük altında her bir eskime süreci ile birlikte sağlam durumu da içerecek şekilde toplam 8 aşamadan oluşan, 12 kHz lik örnekleme frekansına sahip titreşim işaretleri alınmıştır. 10 s lik ölçme sonunda elde edilen bu titreşim işaretinin 0.25 s lik kısmı bu çalışmanın istatistiksel ve spektral analizleri için kullanılmıştır. Bu anlamda, söz konusu titreşim işaretinin sağlam ve yedinci eskitme aşamasına ilişkin zaman serileri aşağıdaki şekillerle verilmiştir.

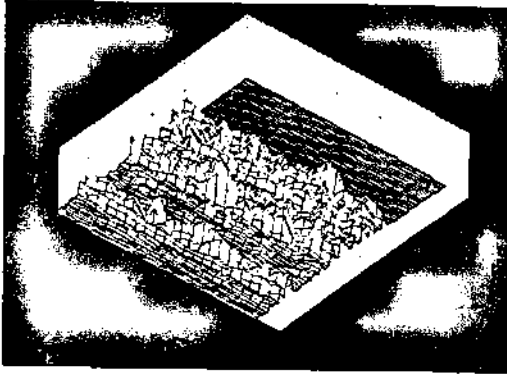


Şekil 3. Titreşim işaretleri. a) Sağlam, b) bozuk durum.

Ayrıca bu işaretlerin KZFD de alınarak, aşağıdaki şekiller elde edilmiştir.



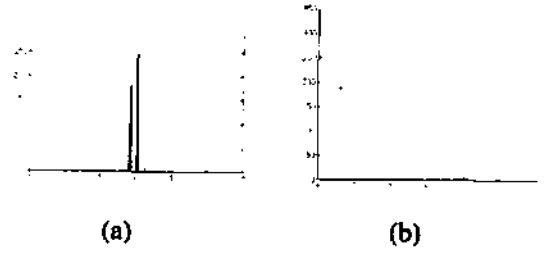
(a)



(b)

Şekil 4. Titreşim işaretleri için KZFD. a) sağlam durum. b) Bozuk durum.

KZFD ne ilişkin şekillerden de görüleceği gibi rulman arızasını karakterize eden farklılık 2-4 kHz arasında yer almaktadır. Böylece 2-4 Hz frekans bandı rulman arızasını tanımlayan bir özellik olarak tanımlanabilir. Yukarıdaki zaman tanım bölgesi titreşim işaretlerinin olasılık dağılım fonksiyonları ise benzer şekilde aşağıdaki gibi normal dağılım şeklinde Şekil 5 a) ve b) ile verilebilir

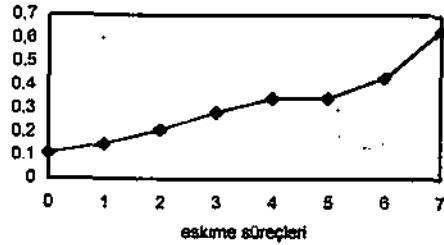


Şekil 5. Olasılık dağılım fonksiyonları. a) Sağlam durum, b) Bozuk durum.

Her bir aşamaya ilişkin hesaplanmış istatistiksel büyüklükler ise Tablo 1 deki gibi verilmiştir. Bu durumda Tablo 1 deki değerlerden standart sapmaya ilişkin değişim, Şekil 5 deki gibi gösterilmiştir.

Tablo 1. Eskitme süreçleri için hesaplanmış istatistiksel büyüklükler.

Eskitme Aşamaları	Aritmetik Ortalama	Standard Sapma	Çarpıklık	Basıklık
0	1.23E-03	0.11	0.044	3.02E+00
1	2.11E-03	0.15	-0.033	2.97E+00
2	5.28E-04	0.21	-5.22E-02	3.00E+00
3	2.51E-04	0.28	-2.28E-03	3.04E+00
4	3.97E-04	0.34	-0.020	3.01E+00
5	1.92E-03	0.35	-0.027	2.93E+00
6	-3.18E-04	0.43	-0.0432	2.99E+00
7	1.13E-02	0.63	-0.070	2.99E+00



Şekil 6. Standart sapma değerlerinin değişimi.

Böylece hesaplanan bu büyüklükler vasıtasıyla makina durum farklılıklarının istatistiksel parametrelerden sadece standart sapma değerlerindeki değişikliklere bağlı olduğu kolaylıkla gösterilebilir. Çünkü Tablo 1'e göre her bir durum için ortalama değer yaklaşık olarak sıfırdır. Ayrıca, çarpıklık ve basıklık parametrelerinin bütün durumlar için yaklaşık olarak  $c = 0$  ve  $k = 3$  değerlerini almasından dolayı olasılık yoğunluk fonksiyonlarının da normal dağılımı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle en önemli istatistiksel değişiklik standart sapma üzerindedir. O zaman  $3\sigma_0$  değeri temel alınarak  $\pm 3\sigma_0$  aralığında %99.7 olasılıkla, gözlenen durumunun sağlam olduğu kabul edilebilir ve bunu aşan standart sapma değerleri ise bozuk duruma karşı gelen değerler

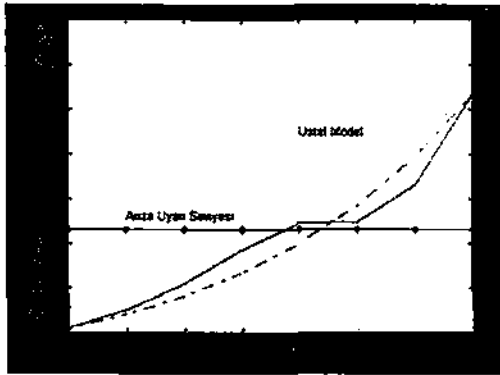
olarak tanımlanabilir. Bu amaçla tanımlanan *Kritik Standart Sapma* (KSS) değeri ( $KSS = \mu_0 + 3\sigma_0$ ) olarak verilebilir.

## 6. SONUÇLAR

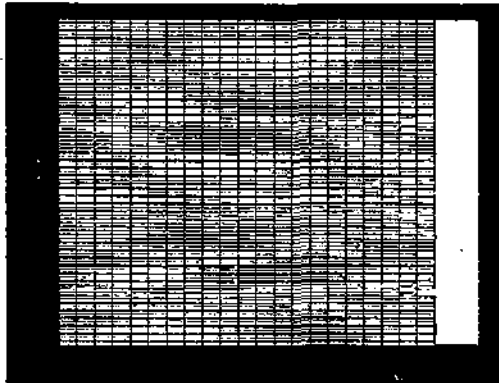
Yapılan bu çalışmada asenkron makinalarda rulman eskimesine ait bilgiler, yapay olarak laboratuvar ortamında üretilmiş olup, makinanın rulman bölgesine yakın bir noktadan alınan titreşim işaretlerinin istatistiksel analizi yapılmıştır. Buna göre her eskitme aşamasının istatistiksel anlamda normal dağılımlı kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca tanımlanan KSS-kritik sapma değeri ile de erken arıza seviyesine ilişkin bir arıza uyarı seviyesi belirtilmiştir ve Denklem (7) ile standart sapmanın üstel modeli verilmiştir.

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left[\frac{n}{4}\right] \quad (7)$$

Burada  $n$ , herhangi bir eskitme sürecini temsil eden tam sayı olup,  $\sigma_0$  ve  $\sigma$  sırasıyla sağlam ve bozuk durumlar için standart sapma değerleridir. Ayrıca en son eskitme aşamasındaki titreşim işaretinin KZFD işleminin bir sonucu olarak, Şekil 7 (b) deki gibi zaman-frekans ( $t, f$ ) düzlemi de verilerek arızayı temsil eden özelliğin zaman içindeki davranışı da gözlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 7. Rulman arıza özellikleri: a) Arıza uyarı seviyesi b) KZFD, zaman-frekans gösterimi.

Böylece bu çalışma ile bir elektrik motoru durumuna ilişkin titreşim işaretlerinin zaman-frekans ve istatistiksel davranış şekli tam olarak belirlenebilmiştir.

## 7. TEŞEKKÜR

Yazarlar, *The University of Tennessee Knoxville, Department of Nuclear Engineering ve Maintenance and Reliability Center* bünyesinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin kullanımı için Prof. Dr. B. R. Upadhyaya'ya teşekkürü bir borç bilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Bowers S.V. ve Piety K.R., "Proactive Motor Monitoring Through Temperature Shaft Current and Magnetic Flux Measurements", *CSI 1993 Users Conference*, Eylül 20-24, 1993.
- [2] Cho K.R., Lang J.H. ve Umas S.D., "Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using State and Parameter Estimation", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Cilt 28, No. 3, s. 702-709, Mayıs-Haziran 1992.
- [3] Nicholas J.R., "Predictive Condition Monitoring of Electric Motors", *P/PM Technology*, s. 28-32, Ağustos 1993.
- [4] Schoen R., Habetler T.G., Kamran F. ve Bartheld R.G., "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring", *Proceedings of IEEE Industrial Application Meeting*, Cilt 1, s. 110-116, 1994.
- [5] Şeker S., Upadhyaya B.R., Erbay A.S., McClanahan J.P. ve DaSilva A.A., "Rotating Machinery Monitoring and Degradation Trending Using Wavelet Transforms", *Proceedings of MARCON' 98 Maintenance and Reliability Conference*, Knoxville, A.B.D., 12-14 Mayıs 1998, Cilt 1, s. 23.01-23.11.